

傾斜した幕が潜密度流に及ぼす影響

朝位孝二 (社会建設工学科) 宇野勝哉 ((株) 日本港湾コンサルタント) 河元信幸 (社会建設工学科)

Effect of Inclined Fence on Density Current

Koji ASAI (Department of Civil and Environmental Engineering)

Katsuya UNO (Japan Port Consultants, LTD.)

Nobuyuki KAWAMOTO (Department of Civil and Environmental Engineering)

Lakes and reservoirs often suffer from freshwater red-tide or freshwater blooms formed by *Microcystis aeruginosa*. Fences are often used to prevent freshwater blooms in lakes and reservoirs by controlling plunge flows. In this study, the effects of an inclination angle and a setting position on hydrodynamics of plunge flows are investigated experimentally.

It is found from study that the plunge point moves upstream-wise and the thickness of the plunge flow become smaller when the non-dimensional setting position and the submerged length of the fence are small. It is also found that the most effective angle of the fence is 30 degree.

Key Words : density current, plunge flow, reservoir, fence

1. はじめに

ダム湖や湖沼などの閉鎖性水域では、淡水赤潮やアオコの発生防止に多大な努力が払われている。淡水赤潮やアオコの発生を防ぐには、要因となる栄養塩の流入などの環境条件を減らしていくことが必要となる。具体的な方法例として、流入栄養塩の除去・阻止、曝気循環による水域内の流動制御と環境条件の操作、放流による滞留時間の短縮、およびフェンス（以下、「幕」と称する）による水域内の流動制御などが挙げられる。

幕は、水域流入部付近の表層に横断方向に設置する幕状のもので、プランクトン集積域への集中を阻止し、さらにはプランクトンの水域内での拡大防止を図る上で有効とされている。水域内の流動制御の立場でみれば栄養塩を含んだ流入水の深層への輸送促進（表層が貧栄養となり、アオコなどの表層に集積するプランクトンの抑制となる）、プランクトンの集積に重要な働きをする補償流（ダム本堤からの戻り流れ）の抑制効果が期待できる。さらに、設置にかかるコストが安価であること、設置後の維持管理が容易であることもあり、実施例が多くある。

幕の水理学的検討は秋山ら¹⁾が、鉛直に垂れ下がった幕形状（以下、垂直幕と呼ぶ）を対象として詳細に実験を行い報告している。しかし、現実の幕は流入水による流体力によって変形している。また幕の先端形状の工夫により、より良い効果も期待できるであろう。したがって単に、垂直

な幕ではなく、様々な形状の幕について検討を行うことが重要である。本研究では、その第一歩として、傾斜した幕（以下、傾斜幕と呼ぶ）が潜密度流に及ぼす影響を実験的に検討した。

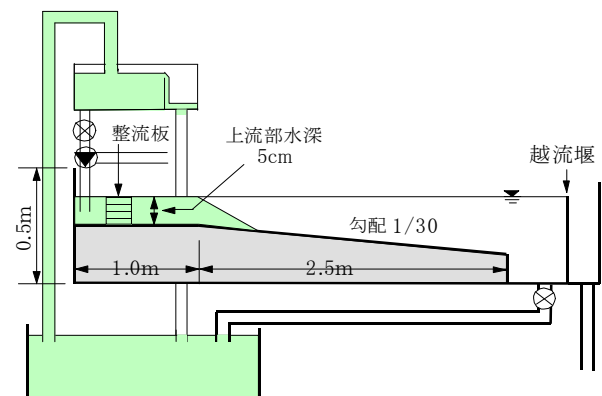


Figure 1. Experimental setup

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験水路は Figure 1 に示すように、全面アクリル製の水槽で、水平区間長 1.0m、勾配 1/30 の傾斜区間長 2.5m、水路幅 10cm、深さ 50cm から構成される。流入水を助走させる水平区間部の水深を 5.0cm に維持できるように、水槽最下流部に越流堰を設けた。

塩水は、供給タンクで作成、濃度調整を行い、ポンプによって量水槽に引き上げられる。それか

ら分岐弁と流量調節バルブによって供給タンク側で流量を調節後、分岐弁の切り替えで水槽内に塩水が流入するようになっている。

また最下流部の水床には、塩水を抜くことができるように排水口をつなげており、下のバルブによって調整できる。抜いた塩水は供給タンクに戻され、また水路内へと循環されるようになっている。

Table 1. Experimental condition (caseA)

case	勾配	流入水深	相対密度差	単位幅流入流量	流入内部 Froude 数	内部限界水深
	I=(1/)	h ₀ (cm)	ε ₀	q ₀ (cm ² /s)	F ₀	h _c (cm)
A-1	30	5	0.0009	10.0	0.95	4.84
A-2				12.5	1.19	5.62
A-3				15.0	1.43	6.34
A-4			0.0013	15.0	1.19	5.61
A-5				17.5	1.39	6.22
A-6				20.0	1.58	6.80
A-7			0.0017	15.0	1.04	5.13
A-8				17.5	1.21	5.69
A-9				20.0	1.39	6.22

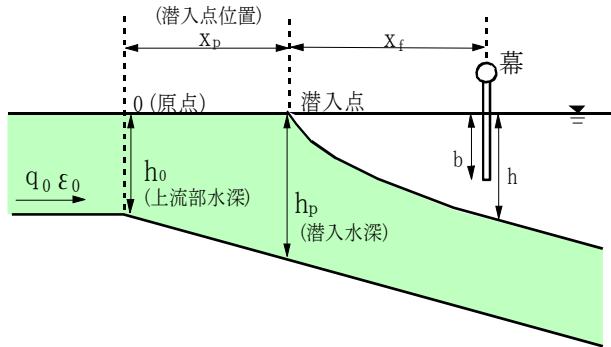


Figure 2. Definition sketch of experiment

(2) 実験条件

実験内容は、潜入密度流そのものの水理特性の把握を目的とした、幕が設置されていない状況での caseA, および幕の設置効果の検討を目的とした、幕が設置された状況での caseB の 2 通りについて実施した。

実験の caseA での水理条件を Table 1 に、潜入密度流の流れの定義図と、幕設置に伴う重要な諸量をあわせて Figure 2 に示す。ここで、勾配 I, 流入水深 h₀(cm), 相対密度差ε₀ (淡水と塩水の密度差), 単位幅流入流量 q₀(cm²/s), 流入内部 Froude 数 F₀, 内部限界水深 hc(cm)である。また、流入内部 Froude 数, 内部限界水深の定義は次式に示す通りである。ここで、g は重力加速度(cm/s²)とする。

$$F_0 = \sqrt{\frac{q_0^2}{\epsilon_0 g h_0^3}} \quad (1)$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q_0^2}{\epsilon_0 \cdot g}} \quad (2)$$

caseA では、相対密度差は 0.0009, 0.0013, 0.0017 の 3 パターンとし、それぞれ流量を変化させた計 9 パターン行った。勾配 I は 1/30, 流入水深 h₀ は 5cm の一定とする。また、Figure 2 において、斜面開始部を原点とし、密度流が水面から分離して潜る点を潜入点とし、その位置での水深を潜入水深 hp とする。淡水と塩水の境界面を界面とし、caseA ではこの界面形状と潜入水深の把握を目的とする。

3. 実験結果

(1) 潜入密度流の流動解析

幕の設置に当たっては、幕がない状況での潜入密度流の特性を十分に把握しておく必要がある。潜入密度流の特性量として重要なものは、潜入水深 hp, 初期混合率γ, 潜入区間長, 界面形状などであるが、その中でも特に重要なものは、潜入水深 hp と初期混合率γである。初期混合については、2 層流モデルに基づき、連行係数を用いて算定する方法^(例えば 3), 潜入密度流領域 (潜入点から下層密度流となるまでの区間) での周囲水の単位幅当たりの総連行量 q_e として捉え、初期混合率γで評価する方法がある。後者は実用上の観点から便利であるため、これまで多くの研究^(例えば 4), 5)で初期混合率γが用いられている。

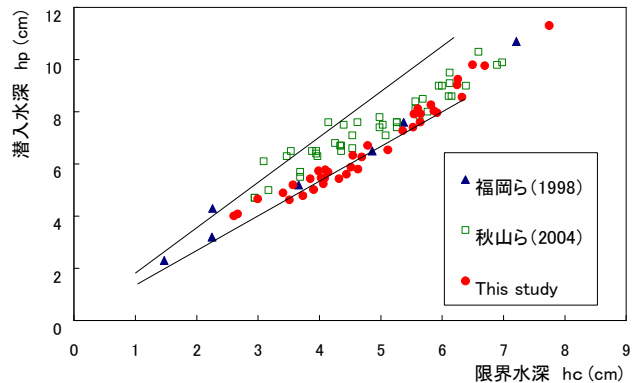


Figure 3. Relationship between water depth at plunge point and critical depth

等幅矩形断面水路では、hp とγはそれぞれ式(3)～式(5)のように定義される。ここに、F_pは潜入点での内部 Froude 数, hc は内部限界水深であり、F_pの定義式も同時に以下に示す。

$$\frac{h_p}{h_c} = F_p^{-2/3} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{q_e}{q_0} \quad (4)$$

$$F_p = \sqrt{\frac{q_0^2}{\epsilon_0 g h_p^3}} \quad (5)$$

潜入密度流についてはこれまで多くの研究^{3)~7)}が行われている。等幅矩形断面水路を対象とした室内実験で得られたこれまでの知見を総括すると、 F_p は約0.25~1.0の範囲の値を取り、かなり散らばることがわかっているが、水路床勾配 I が極めて大きい場合 ($I > 1/10$ のような非現実的な状態)を除けば、多くのデータは $F_p = 0.5 \sim 0.75$ の範囲に収まると考えられる。

Figure 3 は本研究の実験で得られた潜入水深 h_p と限界水深 h_c を描点したものである。図中には、既往の研究^{1)~3)}で得られた結果も同時に示した。これより、本研究で得られた F_p 値は 0.55~0.69 の範囲の値を取り、その平均値 ($F_p \approx 0.62$) は上述した既往の結果と一致している。

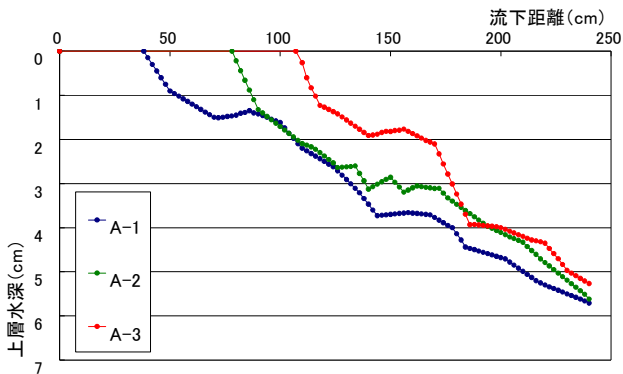


Figure 4. Interface between upper layer and lower layer

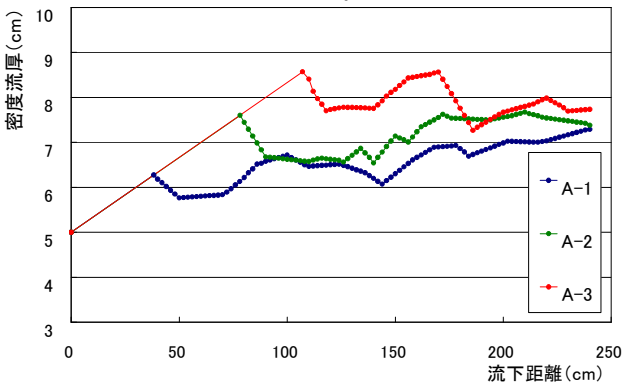


Figure 5. Thickness of plunge flow

Figure 4 に、caseA での界面形状の実験結果の一例を示す。横軸に流下距離 (斜面部からの距離) (cm)、縦軸に上層水深 (淡水厚) (cm) を取っている。横軸が水面を表すことになる。また、Figure 5 は、caseA での密度流厚の実験結果の一例を示している。横軸に流下距離、縦軸に密度流厚 (cm) を取っている。これらの図から、同相対密度差では、単位幅流量を大きくすることにより、潜入点は下流側に移動する傾向があることがわかる。また下層密度流厚は、流量を大きくすることにより増すという傾向も分かるが、その差は 1cm 以内でありほとんど変化はないと考えられる。また、下流側に移動するにつれ、下層密度流厚はほぼ一定値と

なることも確認される。

同流量では、相対密度差を大きくすることにより潜入点が上流側に移動する傾向がある。また、下層密度流厚は相対密度差が小さいと増すという傾向があるが、これも微量でありほとんど変化はないと考えられる。

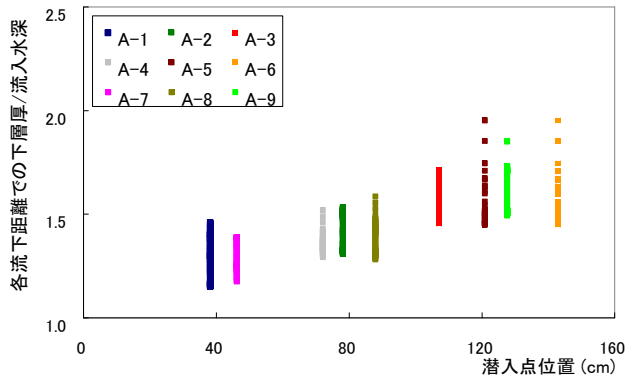


Figure 6. Relationship between position at plunge point and thickness of plunge flow

Figure 6 は、各 case の潜入点位置と流下方向の下層厚の関係を示したものである。縦軸は、各 case における下層厚を流入水深で除した値を取っている。流下方向に下層厚が変化するため、各 case において縦にデータが並んでいる。この縦の並びが大きいほど流下方向に下層厚が大きく変化していることになる。いずれの case も下層厚は流入水深よりも大きくなることが分かる。本実験条件では caseA-7 が最も下層厚の変化が小さいことが分かった。現象的にも密度界面がシャープで変動が小さいことが確認された。

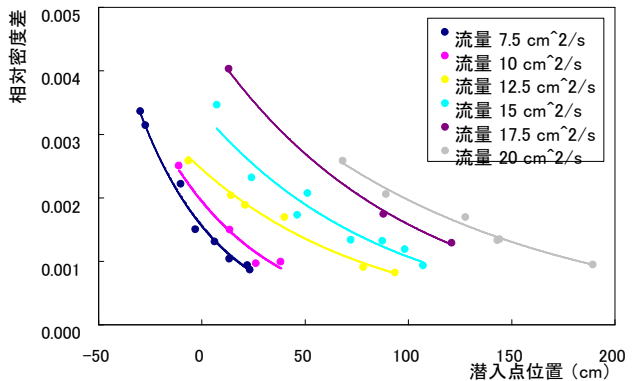


Figure 7. Relationship between position at plunge point and relative density difference

また Figure 7 は、caseA の実験結果に基づき、各単位幅流量における相対密度差と潜入点位置との関係について描画したものである。同時に、caseA で指定した実験条件以外の結果も描画している。横軸に潜入点位置 (cm)、縦軸に相対密度差を取っている。この図を見ても確認されるように、水路床勾配 $I = 1/30$ の条件において、各相対密度差と単位幅流量によりおおよそその潜入点位置は推

測可能である。また、同流量では、相対密度差が大きくなるにつれて潜入点位置が上流側に移動することが確認される。

Table 1. Experimental condition (caseB)

case	勾配	流入水深 h_0 (cm)	相対密度差 ϵ_0	単位幅流入流量 q_0 (cm^2/s)	幕形状	設置位置		
	$I=(1/)$					x_f/h_p	b/h	
B-1-1	30	5.0	0.0017	15.0		2	0.3	
B-1-2							0.5	
B-1-3							1	
B-1-4						5	0.3	
B-1-5							0.5	
B-1-6							1	
B-1-7						8	0.3	
B-1-8							0.5	
B-1-9							1	
B-2-1						2	0.3	
B-2-2							0.5	
B-2-3							1	
B-2-4							5	0.3
B-2-5								0.5
B-2-6								1
B-2-7							8	0.3
B-2-8								0.5
B-2-9								1

(2) 幕の設置効果の検討

次に、幕が設置された状況である caseB についての検討を行う。幕には、厚さ 1mm のアクリル板を用いた。なお、ここでは流体力等による幕の変形については考慮しないこととする。

caseB の実験の水力条件を Table 2 に示す。相対密度差(ϵ_0)、単位幅流入流量(q_0)の決定については、潜入密度流の流動特性が安定していた caseA-7 の条件を採用した。以後、caseA-7 の結果と比較を行い幕の設置効果の検討を行う。

幕形状には、水面から垂直に幕を入れる caseB-1 と、流下方向に 45 度傾けて幕を入れる caseB-2 の 2 通りを行った。幕の設置位置には、無次元設置位置 x_f/h_p を用いた。Figure 2 を参考に、幕が設置されてない状況での潜入点 x_p からの距離となる。また、潜入点より下流側に設置するものとする。caseA-7 の実験結果と比較するので、 $x_p=46.2(\text{cm})$ 、 $h_p=6.54(\text{cm})$ である。よって、 $x_f/h_p=2$ の場合は、幕の設置位置は斜面部から 59.28(cm) の位置ということになる。同様に、 $x_f/h_p=5$ の場合は 78.9(cm)、 $x_f/h_p=8$ の場合は 98.52(cm) の位置になる。幕の設置深さには、無次元設置深さ b/h を用いた。 $b/h=1$ の場合は、密度流に接する位置まで幕を入れるということになる。

また、幕の設置効果の評価として、潜入点位置の上流側への移動、潜入密度流の下層厚の減少に

着目した。前者を流入水の潜入促進効果と呼び、後者を底層への輸送促進効果と呼ぶことにする。

(a) 垂直幕の設置効果の検討

幕の設置効果の評価としては、潜入点位置の上流側への移動、潜入密度流の下層厚の減少に着目する。

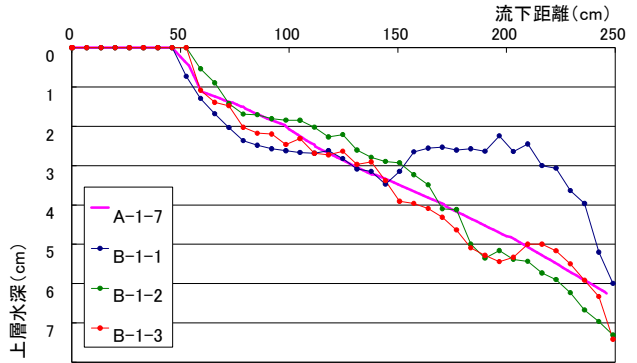


Figure 8. Interface between upper layer and lower layer

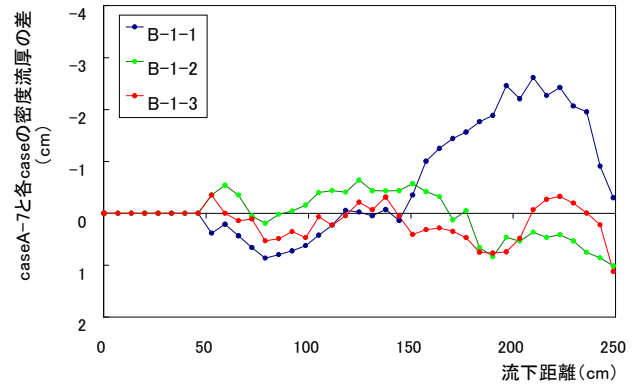


Figure 9. Thickness of plunge flow

Figure 8 に caseB-1 の垂直幕を設置した状況での界面形状の実験結果の一例を示す。横軸に流下距離、縦軸に上層水深を取っている。また、同時に評価基準である caseA-7 の結果も描画している。

Figure 8 から、潜入点に関して各 case とほぼ caseA-7 と同じ位置となった。しかし、caseB-1-1 と caseB-1-3 では、潜入してからしばらくの間、幕がない条件よりも深層に密度流を輸送できていることが分かる。だが、caseB-1-1 では下流側にいくと下層厚が膨らんでしまい、深層への輸送効果は認められない。逆に、caseB-1-2 と caseB-1-3 では、下流側での深層への輸送効果が確認されることが分かる。

Figure 9 に、caseA-7 と各 case の密度流厚の比較図を示す。横軸に流下距離、縦軸に caseA-7 とそれぞれの流下距離での密度流厚から、各 case での密度流厚を引いた値を用いている。縦軸の値が正の場合は、幕の存在により密度流厚が減少したことを意味し、逆に負の場合は幕により密度流厚が増加したことを意味する。アオコ対策における幕

の効果を考えて、この値が正になるのが望ましい。この図からも、上述の結果と同様のことが確認される。また、幕の効果認められるのは caseB-1-2 と caseB-1-3 だが、安定した幕効果は得ることはできていない。

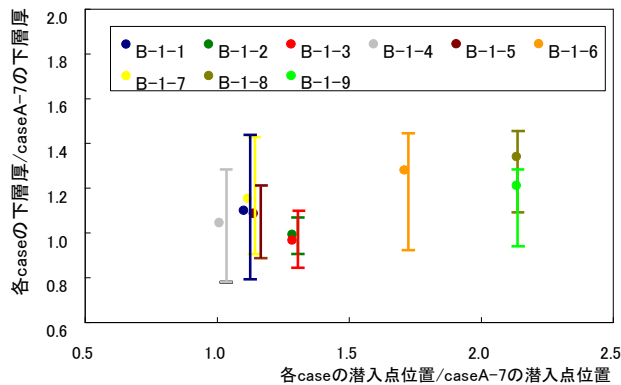


Figure 10. Relationship between normalized position at plunge point and normalized thickness of lower layer

また Figure 10 は、caseB-1 の結果に基づいて、caseA-7 との潜入点位置の相対位置、密度流厚の相対変化を示す図である。横軸はそれぞれの case の潜入点位置を、caseA-7 の潜入点位置で除した値であり、この値が 1 より小さければ潜入点が上流側へ移動したことを意味する。縦軸は、それぞれの case の潜入点位置を基準にして、基準からの各流下距離に対する下層厚を、caseA-7 の下層厚で除した値であり、この値が 1 より小さければ、下層厚が小さくなったことを意味する。

下層厚の減少効果は、全ての case において下層厚の増減があるため、安定した効果を得ることができない。また、流入水の潜入促進効果においても、全ての case において潜入点位置が下流側へ移動し、期待される幕の効果を得ることができないことがわかる。

以上より、垂直幕の設置効果として以下のことが確認された。

幕の無次元設置位置、深さがともに小さい場合 ($x_p/h_p=2$ or 5 , $b/h=0.3$)、潜入点付近の下層厚の増減効果はあるが、流下方向側では下層厚の増加傾向がある。また、 b/h を大きくすることにより、流下方向側での下層厚の減少効果は得られるものの、潜入点を幕設置位置にまで移動させることになり、本研究での期待される効果を安定して得ることはできない。

(b) 傾斜幕の設置効果の検討

Figure 11 に、caseB-2 の傾斜幕を設置した条件での界面形状の実験結果の一例を示す。横軸に流下距離、縦軸に上層水深を取っている。また、同時に評価基準である caseA-7 の結果も描画している。

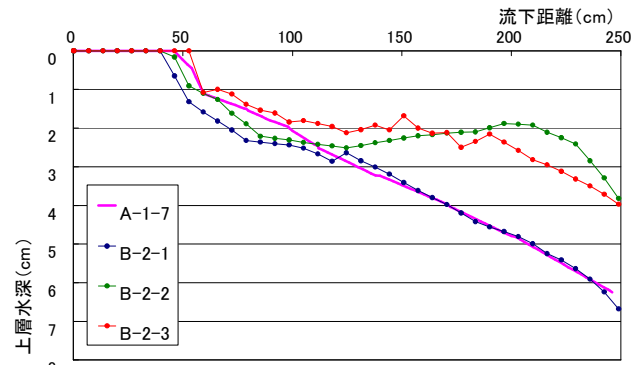


Figure 11. Interface between upper layer and lower layer

実験結果から、caseB-2-2 と caseB-2-3 では、下層密度流厚が大きくなり、その効果は見られない。しかし、caseB-2-1 では、潜入点を上流側に移動させることができると共に、下層密度流厚も、幕を設置しない条件と同様な値を得ることになった。また、潜入してからしばらくの間、深層への輸送効果も確認できる。しかし、下流側では幕がない条件と同様な値を取ることとなり、効果は確認できない。

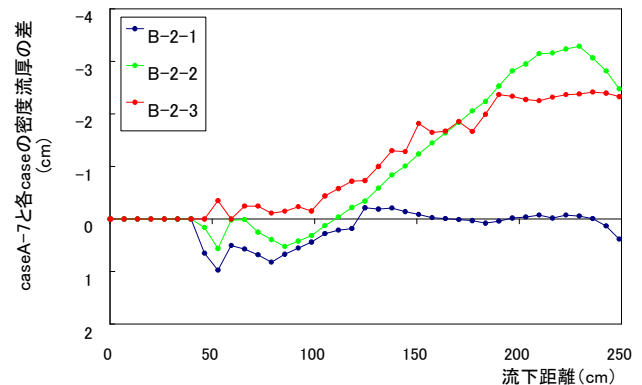


Figure 12. Thickness of plunge flow

Figure 12 に、caseB-2 でのそれぞれの case の caseA-7 との密度流厚の比較図を示す。横軸に流下距離、縦軸に caseA-7 のそれぞれの流下距離での密度流厚から、各 case での密度流厚を引いた値を取っている。

この図を見ても明らかなように、caseB-2-1 では幕設置位置からしばらくの間、密度流を下層側に押し下げることができており、下流側でも caseA-7 と同等の値を得ることができている。その他の条件では、全て密度流厚を増加させる結果となった。

Figure 13 は、caseB-2 の結果に基づいて、caseA-7 との潜入点位置の相対位置、下層厚の相対変化を示した図である。縦軸は、それぞれの case の潜入点位置を基準にして、基準からの各流下距離に対する下層厚を、caseA-7 の下層厚で除した値であり、この値が 1 より小さければ、下層厚が小さくなったこととなる。横軸はそれぞれの case の潜入

点位置を, caseA-7 の潜入点位置 (46.2(cm)) で除した値であり, この値が 1 より小さければ潜入点が上流側へ移動したことになる.

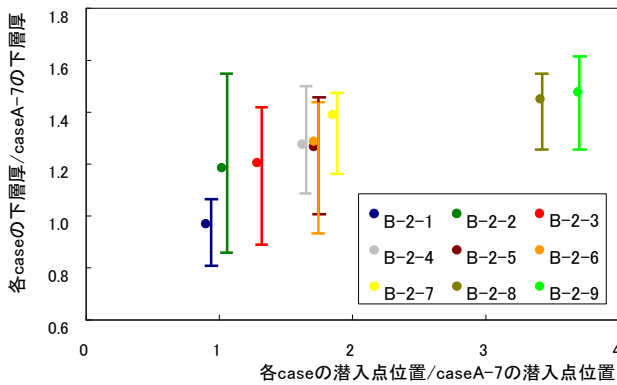


Figure 13. Relationship between normalized position at plunge point and normalized thickness of lower layer

無次元設置位置, 設置深さがともに小さい場合 (caseB-2-1)は, 潜入点位置が上流側に移動し, 流入水の潜入促進効果を得ることができる. また, 下層厚においても, 多少の増加傾向が見られる部分もあるが, 平均的には減少効果が見られ, 幕設置効果が期待されることが確認される. しかしながら, その他の全ての case では, 潜入点を流下方向側に移動するとともに, 下層厚も増加傾向にあり, 期待される幕効果とは違う効果を得ることが確認された. 以上より, 流下方向に 45 度傾けた幕の設置効果として以下のことが確認された.

幕の無次元設置位置, 設置深さがともに小さい場合 ($x_r/h_p=5$, $b/h=0.3$), 潜入点が上流側に移動するとともに, 下層厚の減少効果も得ることができ, 幕設置効果が期待できる.

(C) 傾斜幕の設置角度による効果の検討

幕は傾斜させることで, その効果が期待できることが確認できた. ここでは, より良い幕の設置条件の模索として, 幕の設置角度を変化させた場合の潜入密度流に及ぼす影響について検討を行った. 実験条件は, 垂直幕, 傾斜幕の設置効果の中で最も効果の確認できた caseB-2-1 に着目して検討を行う.

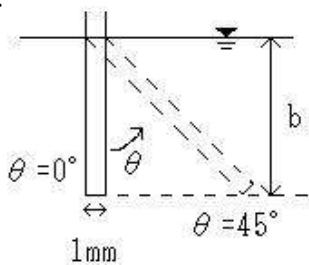


Figure 14. Definition sketch of incline angle

幕の設置角度の基準を Figure 14 に示す. 実験条件は caseB-2-1 と同様とした. 幕の設置角度は,

水面に垂直に幕を設置した場合を $\theta=0^\circ$ (垂直幕) とし, 下流側に沿って θ を取り, それぞれ $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, -45^\circ$ の計 5case について比較検討を行う. その際, caseB-3-1 は caseB-1-1, caseB-3-3 は caseB-2-1 の結果を用いるものとする.

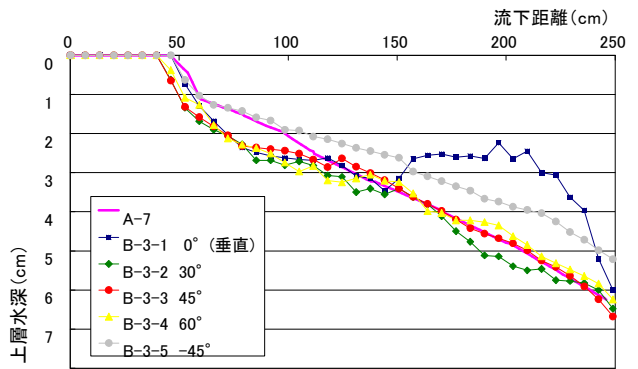


Figure 15. Interface between upper layer and down layer

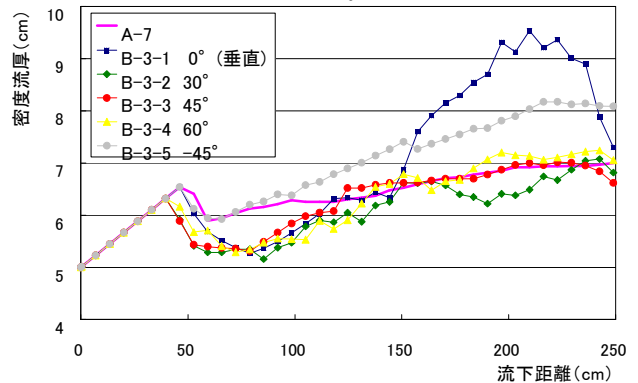


Figure 16. Thickness of plunge flow

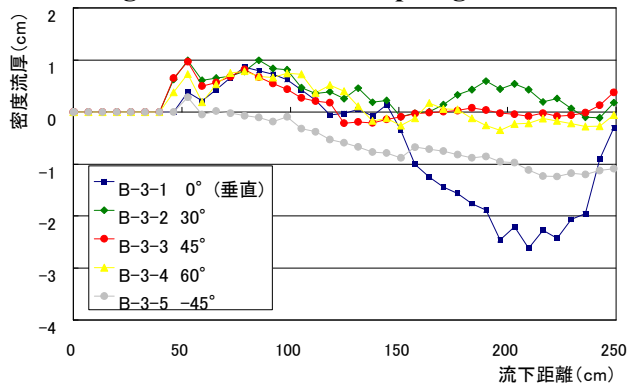


Figure 17. Thickness of plunge flow

Figure 15 に, 各 case の界面形状図, Figure 16 は密度流厚比較図である. Figure 17 は, それぞれの case の各流下距離での密度流厚を, 比較対象である caseA-7 の密度流厚で引いた値を縦軸に取っており, この値が正になるのが望ましい.

caseB-3-5 の幕設置角度が -45 度では, 潜入点は caseA-7 と同程度の値となったが, 密度流厚は大きくなり, 効果は認められない. しかし, 幕設置角度が 30 度である caseB-3-2 では, caseB-2 (幕設置角度 45 度) で最も効果があった caseB-3-3 より

も、潜入密度流厚、下流側での密度流厚ともに小さくすることができ、その効果が確認された。caseB-3-4 でも、caseB-3-3 と同程度の効果が確認された。

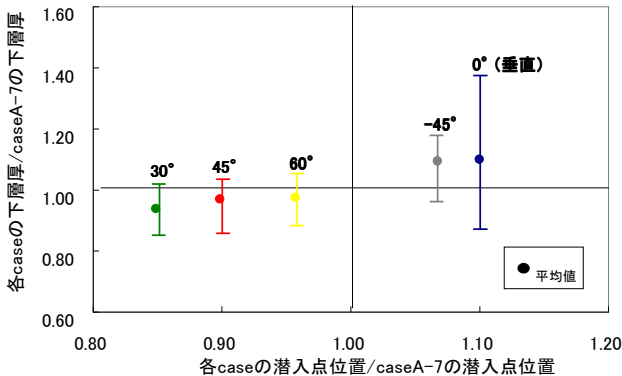


Figure 18. Relationship between normalized position at plunge point and normalized thickness of lower layer

Figure 18 は、caseB-3 の結果に基づいて、caseA-7 との潜入点位置の相対位置、密度流厚の相対変化を示した図である。横軸はそれぞれの case の潜入点位置を、caseA-7 の潜入点位置 (46.2(cm)) で除した値であり、この値が 1 より小さければ潜入点が上流側へ移動したことを示唆する。縦軸は、それぞれの case の潜入点位置を基準にして、基準からの各流下距離に対する下層厚を、caseA-7 の下層厚で除した値であり、この値が 1 より小さければ、下層厚が小さくなったことを示唆する。

幕の設置角度を流れ方向に 0°, 45° の case では潜入点位置が流れ下流側に移動し、下層密度流層厚も増大し幕設置効果は期待できない。しかし、幕の設置角度を流れ方向 30°, 45°, 60° では潜入点位置が流れ上流側に移動するとともに、下層厚も小さくすることができ、幕効果が確認された。また、幕設置角度が 30° の case が本実験の中で最も良い効果が得られた。

以上より、幕の設置角度が潜入密度流に及ぼす影響として以下のことが確認された。無次元設置位置、設置深さがともに小さく ($x_p/h_p=2$, $b/h=0.3$)、水面に対する幕の設置角度が 30 度～60 度の条件の場合、幕がない条件での潜入点より上流側で潜入するとともに、密度流の深層への輸送促進効果も認められた。また、最も良い幕設置角度は水面に対して流下方向側に 30 度傾けた場合である。

4. おわりに

本研究より、勾配 $I=1/30$ の急勾配矩形断面水路での潜入密度流および幕の設置効果についての結果を以下に示す。

1) 潜入点での内部 Froude 数は、0.60 程度の値と

なり、既往の研究と同程度の値が得られた。また、流量、相対密度差から、潜入点位置は把握することが可能である。

- 2) 幕の無次元設置位置、深さがともに小さい場合 ($x_p/h_p=2$ or 5 , $b/h=0.3$)、潜入点付近の下層厚の増減効果はあるが、流下方向側では下層厚の増加傾向がある。また、 b/h を大きくすることにより、流下方向側での下層厚の減少効果は得られるものの、潜入点を幕設置位置にまで移動させることになり、本研究での期待される効果を安定して得ることはできない。
- 3) 幕の無次元設置位置、設置深さがともに小さい場合 ($x_p/h_p=5$, $b/h=0.3$)、潜入点が上流側に移動するとともに、下層厚の減少効果も得ることができ、幕設置効果が期待できる。幕の設置角度を流れ方向側に 30°, 45°, 60° の場合においても幕設置効果が確認され、また、設置角度が 30° の場合が最も良い効果が得られた。

以上、本研究では傾斜した幕が潜入密度流に及ぼす影響を実験的に検討した。今後は、その他の水理条件においても本研究で得られた幕効果が再現できるか検討を行う必要がある。また、さらに効果のある幕の形状や設置位置を模索することも重要である。

参考文献

- 1) 秋山壽一郎・アキレス クマール ジャ・山下直樹・浦勝：ダム貯水池上流端での富栄養化対策を目的とした遮蔽幕による潜入密度流の制御、水工学論文集、第 46 巻、pp.1013-1018, 2002
- 2) 秋山壽一郎・西恭太・浦勝：潜入密度流の流動特性とフェンス工による流動制御、水工学論文集、第 47 巻、pp.1177-1182, 2003
- 3) 福山捷二・福嶋祐介・中村健一：2 次元貯水池密度流の潜り込み水深と界面形状、土木学会論文報告集、第 302 号 pp.55-65, 1980
- 4) 岸力・板倉忠興：第 16 回自然災害シンポジウム講演論文集、pp.235-238, 1979
- 5) Farrell, G.J. & Stefan, H.G.: Mathematical modeling of plunging reservoir flows, J. of Hydraulic Research, Vol.26, No.2, pp.525-537, 1988
- 6) 有田正光・塚原千明：貯水池密度流の潜り点の水理条件に関する実験的研究、ながれ、第 15 巻、pp.409-416, 1996
- 7) Lee, H.Y. & Yu, W.S.: Experimental study on reservoir turbidity current, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.123, No.6, pp.520-528, 1997

(平成 19 年 12 月 27 日受理)